

И. Н. Пыжов, д-р техн. наук, В. А. Федорович, д-р техн. наук,  
И. В. Волошкина, Харьков, Украина

## **СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ ПСТМ В РЕЖИМЕ САМОЗАТАЧИВАНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ**

*Розглянуто питання, пов'язані з особливостями процесу шліфування полікристалічних надтвердих матеріалів алмазними кругами на органічних зв'язках в режимі самозаточування. Показано визначальну роль силового фактора в цьому процесі. Визначено ступінь впливу основних факторів, що визначають умови обробки, на складові сили різання, номінальний тиск в контакті і ефективну потужність шліфування. Встановлено особлива роль поперечної подачі з точки зору стабілізації процесу самозаточування алмазних кругів на органічних зв'язках.*

*Ключові слова: полікристалічні надтверді матеріали, алмазний круг, алмазоносний шар круга, ріжучий рельєф круга, органічна зв'язка, самозаточування круга, нормальна і тангенціальна складові сили різання, тиск в зоні контакту, ефективна потужність шліфування, періодичність процесу шліфування*

*Рассмотрены вопросы, связанные с особенностями процесса шлифования поликристаллических сверхтвердых материалов алмазными кругами на органических связках в режиме самозатачивания. Показана определяющая роль силового фактора в этом процессе. Определена степень влияния основных факторов, определяющих условия обработки, на составляющие силы резания, номинальное давление в контакте и эффективную мощность шлифования. Установлена особая роль поперечной подачи с точки зрения стабилизации процесса самозатачивания алмазных кругов на органических связках.*

*Ключевые слова: поликристаллические сверхтвердые материалы, алмазный круг, алмазоносный слой круга, режущий рельеф круга, органическая связка, самозатачивание круга, нормальная и тангенциальная составляющие силы резания, давление в зоне контакта, эффективная мощность шлифования, периодичность процесса шлифования*

*Questions related to the features of the grinding process of polycrystalline superhard materials by diamond wheels on organic bonds in the self-sharpening mode are considered. The determining role of the force factor in this process is shown. The degree of influence of the main factors determining the processing conditions on the components of the cutting force, the nominal contact pressure and the effective grinding power are determined. A special role of transverse feeding has been established from the point of view of stabilization of the process of self-sharpening of diamond wheels on organic bonds.*

*Keywords: polycrystalline superhard materials, diamond wheel, diamond-bearing layer of the wheel, cutting wheel relief, organic bond, self-sharpening of the wheel, normal and tangential components of cutting force, pressure in contact zone, effective grinding power, periodicity of grinding process*

**1. Постановка проблемы.** Уникальные физико-механические свойства поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) к которым в первую очередь относятся синтетические поликристаллические алмазы (СПА) и плотные модификации нитрида бора (ПТНБ) позволили им сразу же найти возможность широкого использования во многих областях народного хозяйства [1-3]. Одним из наиболее распространенных методов

формообразования изделий (в том числе и режущих инструментов) из таких обрабатываемых материалов (ОМ) является алмазное шлифование кругами на органических связках [1]. Установлено, что такие круги могут работать в режиме самозатачивания, однако механизм их самозатачивания при обработке ПСТМ имеет ряд особенностей [4].

Исследования показали, что процесс шлифования ПСТМ в режиме самозатачивания кругов на органических связках является высокосиловым. Это во многих случаях может негативно отразиться на качестве изделий, изготавливаемых из ПСТМ с использованием такого метода шлифования. Однако на сегодняшний день отсутствуют данные о возможности управления силовыми характеристиками процесса шлифования путем изменения условий обработки.

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** Как было установлено предыдущими исследованиями [4], алмазные круги на органических связках могут успешно осуществлять шлифование ПСТМ в режиме самозатачивания без дополнительной правки до полного износа алмазоносного слоя. Экспериментально доказано, что такой процесс является высокосиловым поскольку механизм самозатачивания алмазоносного слоя круга предопределяется вдавливанием ПСТМ в связку, в результате чего алмазные зерна начинают испытывать значительные по величине изгибающие и растягивающие нагрузки. Учитывая, что предел прочности алмаза на изгиб и растяжение на порядок меньше, чем на сжатие, это обуславливает интенсивное самозатачивание алмазных зерен с образованием на них острых микро - и субмикроромок. Это и обеспечивает резкую интенсификацию съема припуска с ПСТМ. Впервые установлено [4], что процесс самозатачивания круга происходит периодически, затухая и возобновляясь вновь, что свидетельствует о наличии резерва для повышения эффективности процесса шлифования.

Представленная работа посвящена совершенствованию процесса обработки ПСТМ алмазными кругами на органических связках за счет выявления его физических и технологических особенностей.

**3. Цель исследования.** Установление влияния условий обработки на силовые характеристики процесса шлифования ПСТМ в режиме самозатачивания алмазных кругов на органических связках и выявление на этой основе резервов повышения его эффективности.

#### **4. Основные материалы исследования.**

Высокие нагрузки в зоне контакта ПСТМ с алмазным кругом, которыми характеризуется процесс самозатачивания его алмазоносного слоя, могут оказывать неблагоприятное влияние на качество изделий из ПСТМ (растрескивание ОМ, сколы на режущих кромках и т.д.). Поскольку обработка ПСТМ в настоящее время производится на обычных заточных и шлифовальных станках, которые, как правило, не предназначены для работы

в таких условиях, то это может привести к потере ими точности, и даже преждевременному выходу их из строя. Потеря станками точности в сочетании с большими деформациями в технологической системе, а также скачкообразность съема припуска с ОМ зачастую не позволяет получить требуемую точность при изготовлении изделий (в том числе и режущих инструментов) из ПСТМ. В связи с этим приобретает определенную актуальность задача установления возможности уменьшения сил и давления в контакте РПК с ПНТМ путем изменения режима обработки и характеристики кругов.

*Влияние условий обработки, на силы резания и давление в контакте.* Предыдущие исследования [4] показали, что уровень составляющих силы резания  $R_y$  и  $R_z$  при обработке СПА значительно выше, чем при обработке ПТНБ. Здесь интересно отметить, что влияние твердости ОМ корректно исследовать только в пределах одной группы ПСТМ (СПА или ПТНБ).

Площадь контакта ОМ с РПК оказывает значительное влияние на силы резания, поскольку она определяет число алмазных зерен в контакте с ПСТМ. Установлено, что на значение нормальной составляющей силы резания существенное влияние оказывает площадь контакта ПСТМ с РПК. Это вполне закономерно, поскольку круг самозатачивается при строго определенном значении давления в контакте. Этим объясняется повышенная трудоемкость обработки торцов двухслойных пластин из ПСТМ по сравнению со шлифованием боковых поверхностей. Поскольку в настоящее время намечается тенденция к еще большему увеличению размеров пластин, эта проблема еще более усугубится, так как на обычном оборудовании их обработка кругами в режиме самозатачивания будет сопряжена с повышенными трудностями.

Одним из путей снижения составляющих силы резания в таких условиях является применение алмазных кругов с малыми ширинами рабочей поверхности, что позволяет уменьшить величину площади контакта при шлифовании пластин больших размеров. Однако в этом случае должна быть решена задача повышения жесткости самого алмазного круга, хотя и это не позволяет полностью решить проблему, так как резко интенсифицируется линейный износ круга, что ведет к снижению точности изделий из ПСТМ.

Заметное влияние на силовую напряженность процесса должна оказывать характеристика круга (зернистость, концентрация, связка, марка алмазных зерен) так как с их изменением меняются размеры зерен, их количество на рабочей поверхности круга, а также прочностные свойства зерен и связки. Последнее обстоятельство заслуживает особого внимания, так как именно связка оказывает сопротивление вдавливанию в нее зерен и поликристалла. Так, например, металлоорганическая связка Т02, имеющая в своем составе в качестве наполнителя медный порошок, менее твердая, чем связка Б1 (наполнитель – карбид бора), обеспечивает несколько меньшее

значение  $R_n$  (примерно на 12,5%). В то же время связка T02 менее хрупкая, что вызывает рост составляющей силы резания  $P_z$  примерно на 15% за счет увеличения предела прочности на изгиб [1]. Следует отметить, что из всех серийно выпускаемых органических связок связка T02 обеспечивает наименьшее значение давления в контакте. Поэтому она и была принята за основу для дальнейших исследований.

Снижение концентрации алмазов круга, приводящее к уменьшению числа зерен на его рабочей поверхности, а, следовательно, и в контакте с ПСТМ, несомненно, должно приводить к уменьшению значений давления в контакте и составляющих силы резания (в дальнейшем речь идет о максимальных их значениях). Это подтверждается экспериментально (рис. 1). Снижение концентрации со 150 до 50% при шлифовании СПА обеспечивает уменьшение нормальной силы и давления в контакте примерно в 1,7 раза, а силы  $P_z$  и мощности  $N_z$  в 1,8 раза. Последнее обстоятельство объясняется тем, что предел прочности зерен на изгиб примерно в 2 раза выше, чем у связки.

Незначительное повышение прочности зерен с увеличением их размеров при существенном уменьшении их количества в контакте с ПСТМ может служить, по-видимому, объяснением факта снижения  $R_n$  и  $R_y$  с увеличением зернистости алмазного круга. Как видно из рисунка 2 в диапазоне размеров зерен 50/40-200/160 значения  $R_n$  и  $R_y$  уменьшаются в 1,2 раза. В то же время сила  $P_z$ , а также мощность шлифования примерно во столько же увеличиваются. Интересно отметить, что периодичность показателей при  $Z=50/40$  практически отсутствует, т.е. процесс идет стабильно.

С ростом скорости шлифовального круга силовая напряженность процесса обработки несколько снижается (рис. 3). Так, например, нормальная сила (давление в контакте) уменьшаются до 1,4 раз, а тангенциальная сила (мощность шлифования) до 1,5 раз. Объяснить этот факт можно тем, что с ростом скорости улучшаются динамические условия процесса, что способствует более интенсивному самозатачиванию алмазных зерен круга.

Наличие периодичности процесса самозатачивания алмазных кругов [4] при шлифовании ПСТМ позволяет сделать вывод о невозможности снижения силовой напряженности путем уменьшения величины поперечной подачи. В этом случае по мере роста поперечной подачи должно наблюдаться лишь увеличение минимальных значений выходных показателей, характеризующих силовую напряженность процесса которые будут постепенно стремиться к пиковым (максимальным) их значениям вплоть до стабилизации процесса самозатачивания алмазного круга.

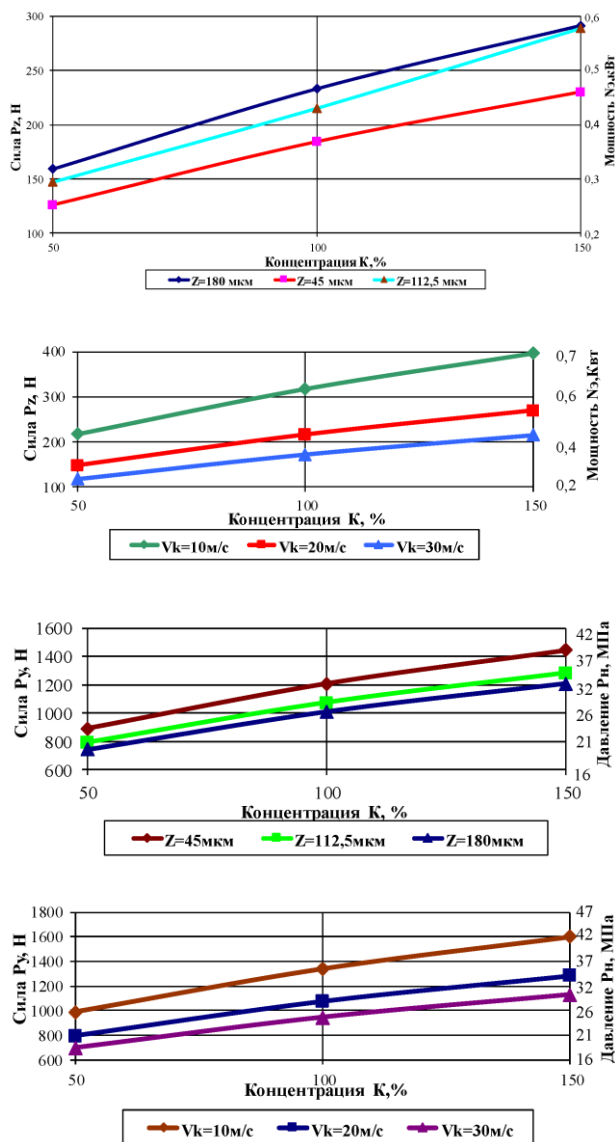


Рисунок 1 – Влияние концентрации алмазного круга на  $P_y$ ,  $P_n$ ,  $P_z$  и  $N_z$   
 Общие условия обработки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 TO2 100%  
 $V_k=20$  м/с,  $S_{пр}=1$  м/мин, СОТС–3%-й раствор  $Na_2CO_3$  в воде

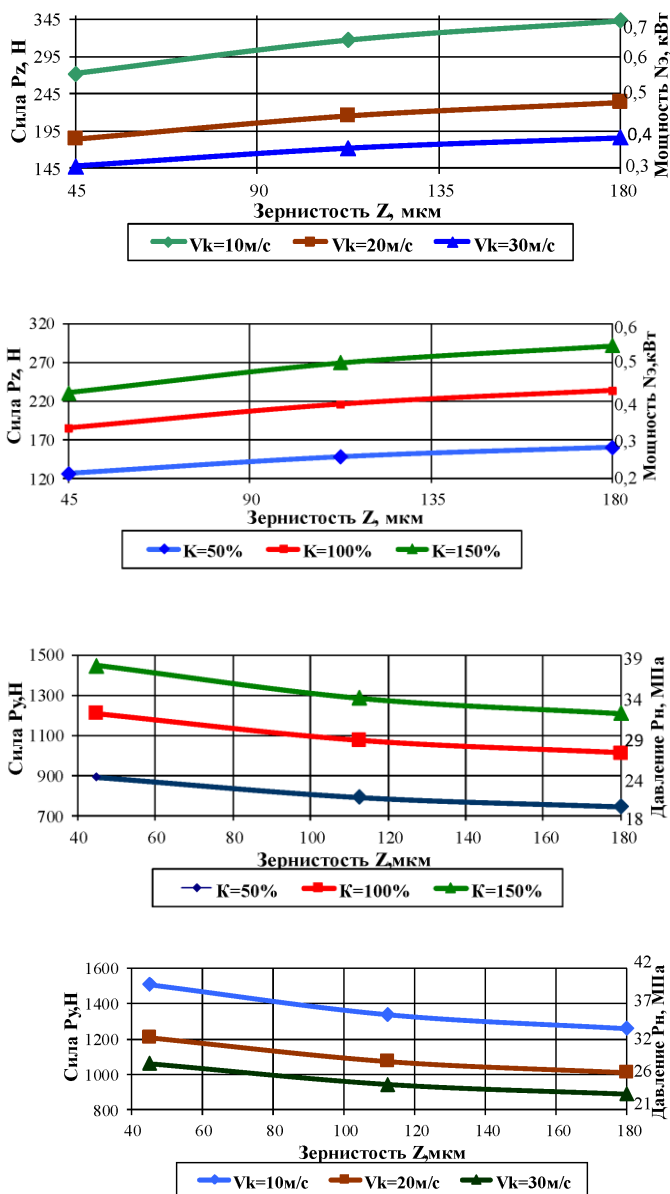


Рисунок 2 – Влияние зернистости алмазного круга на  $P_y$ ,  $P_n$ ,  $P_z$  и  $N_z$   
 Общие условия обработки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 TO2 100%  
 $V_k=20\text{ м/с}$ ,  $S_{пр}=1\text{ м/мин}$ , COTC–3%-й раствор  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в воде

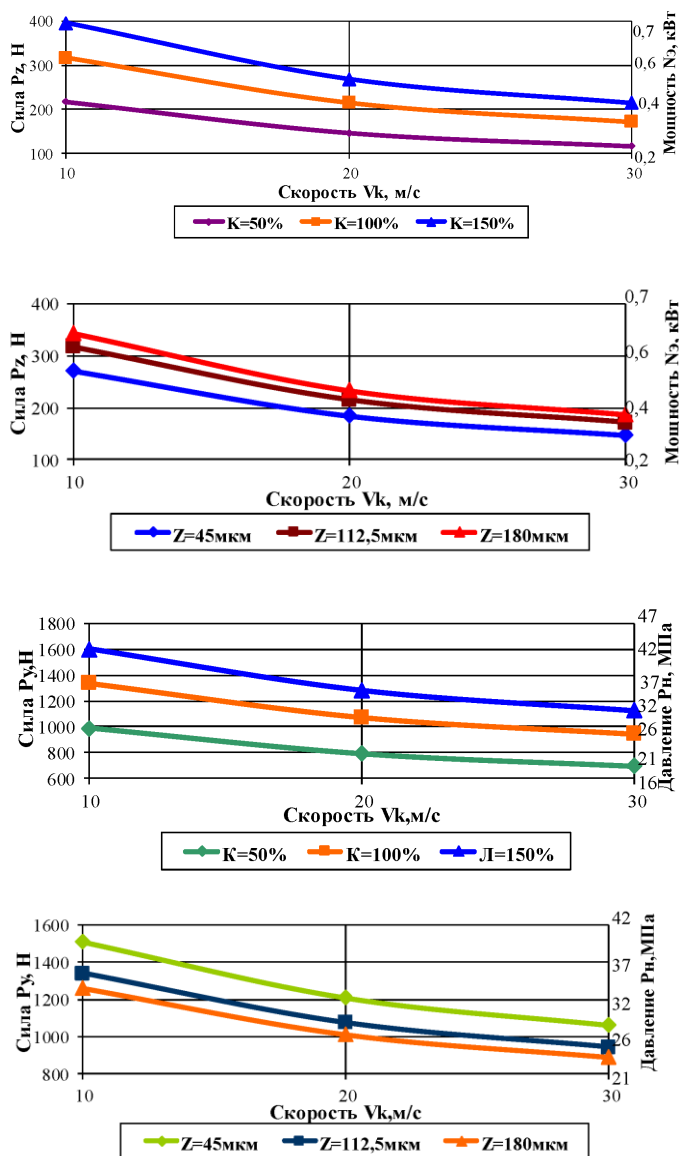


Рисунок 3 – Влияние скорости алмазного круга на  $P_y$ ,  $P_n$ ,  $P_z$  и  $N_z$   
 Общие условия обработки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 TO2 100%  
 $V_k=20$  м/с,  $S_{пр}=1$  м/мин, СОТС–3%-й раствор  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в воде

Минимальные значения давления контакте ( $P_n=15,9$  МПа) можно получить при следующих значениях исследуемых параметров:  $K=50\%$ ;  $Z=200/160$ ;  $V_k = 40$  м/с.

Таким образом, проведенные выше исследования позволяют заключить, что использование алмазных кругов на органических связках для шлифования ПСТМ в режиме самозатачивания неизбежно связано со значительным уровнем силовой напряженности процесса обработки. Решить эту задачу путем изменения режимов обработки и характеристики круга для существующих марок органических связок не представляется возможным. Теоретически возможно создание связок, которые будут самозатачиваться при требуемых уровнях давления в контакте. Однако это практически неизбежно будет сопровождаться повышенным удельным расходом алмазных кругов.

*Роль поперечной подачи для стабилизации процесса самозатачивания алмазоносного слоя кругов на органических связках.* Периодичность изменения физических и технологических показателей процесса алмазного шлифования ПСТМ [4] свидетельствует о несоответствии величины поперечной подачи суммарному значению съема ПСТМ и износа круга, а, следовательно, о недостаточно полном использовании потенциальной режущей способности кругов. Другими словами, наличие периодичности свидетельствует о некоем резерве повышения производительности без увеличения максимального уровня силовой напряженности процесса.

Как уже отмечалось, причиной падения значений выходных показателей после начала их всплеска является несоответствие величины  $S_{\text{non}}$  суммарной величине съема ПСТМ и износа круга. А это ведет к уменьшению натяга в технологической системе, а, следовательно, и нормальной составляющей силы, в результате чего самозатачивание круга прекращается. Поскольку максимальные (пиковые) значения сил, давления в контакте и других показателей в некотором диапазоне изменения  $S_{\text{non}}$  не зависят от ее величины, то, увеличивая  $S_{\text{non}}$ , можно регулировать момент прекращения падения значений выходных показателей без изменения их максимальных значений и при определенной величине  $S_{\text{non}}$  стабилизировать процесс.

Как видно из рис. 4, при  $S_{\text{non}}=0,02$  мм/дв. ход период следования всплесков и их амплитуда уменьшаются по сравнению с  $S_{\text{non}}=0,01$  мм/дв. ход. Однако происходит это за счет роста их минимальных значений при неизменной пиковой величине. При  $S_{\text{non}}=0,04$  мм/дв. ход процесс шлифования стабилизируется. Таким образом, без увеличения максимальных значений давления в контакте и мощности шлифования производительность (для данных условий обработки) существенно возрастает. Этот процесс сопровождается уменьшением удельного расхода алмазов круга примерно в 1,6 раза, что значительно повышает эффективность процесса шлифования.



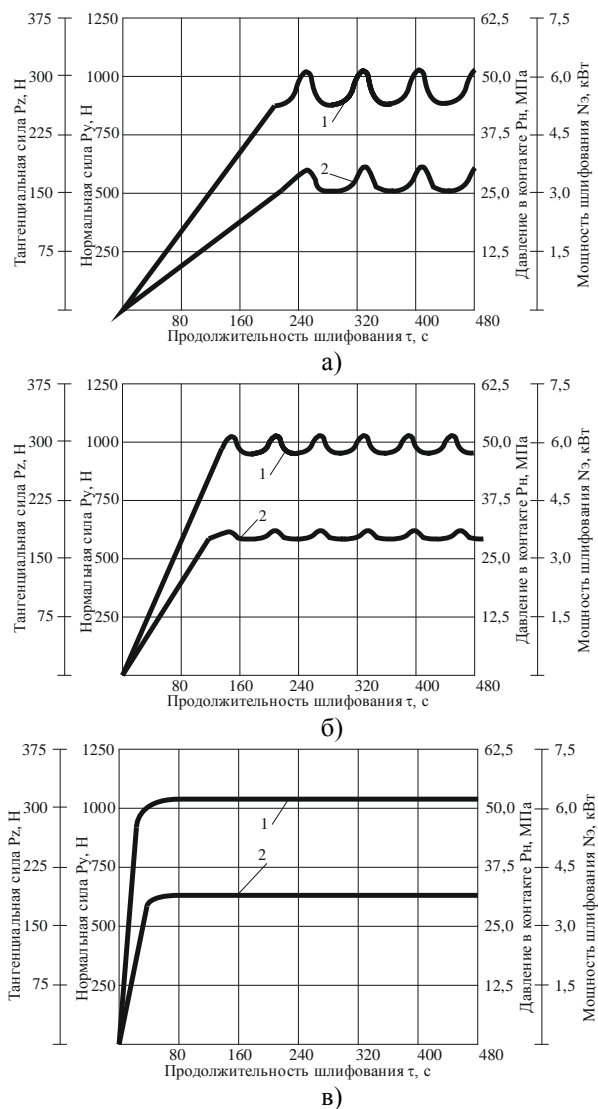


Рисунок 4 – Влияние поперечной подачи на выходные показатели обработки  
1 –  $P_y$  ( $P_n$ ); 2 –  $P_z$  ( $N_z$ )

а)- $S_{\text{поп.}}=0,01$  мм/дв. ход; б)- $S_{\text{поп.}}=0,02$  мм/дв. ход; в)- $S_{\text{поп.}}=0,035$  мм/дв. ход

Условия обработки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 B2-01 100%

$V_k=20$  м/с,  $S_{\text{пр.}}=1$  м/мин, COTC-3%-й раствор  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в воде

Обрабатываемый материал – СПА марки АСБ [1]  $Sk \approx 20 \text{ мм}^2$

Эксперименты показали, что это единственный эффективный в данных условиях путь, позволяющий повысить производительность обработки путем стабилизации процесса. Такие параметры периодичности, как величина периода и амплитуда всплесков, несут в себе информацию о потенциальных возможностях данного круга. Чем выше их значения, тем большую производительность может обеспечить он без увеличения максимальных величин давления в контакте и мощности шлифования.

Экспериментально установлено, что величину поперечной подачи, при которой исключается периодичность изменения физических и технологических показателей обработки, приближенно можно рассчитывать по эмпирической зависимости [5]:

$$S_{\text{non.}} = \frac{30}{H_{\text{ПСТМ}}^3 \cdot S_k \cdot \text{HRB}},$$

где  $S_{\text{non.}}$  – поперечная подача, мм/дв. ход;  $H_{\text{ПСТМ}}$  – микротвердость ПСТМ, ГПа;  $S_k$  – площадь контакта ПСТМ с РПК, м<sup>2</sup>;  $\text{HRB}$  – условная твердость связки круга.

Формула справедлива в следующих диапазонах условий обработки:  $V_k = 20 - 40$  м/с;  $Z = 125/100 - 200/160$ ;  $K = 50 - 100\%$ .

Рассчитанные по формуле оптимальные значения  $S_{\text{non.}}$  (при которых процесс шлифования стабилизируется) для некоторых марок связок кругов и ПСТМ представлены в табл.

Таблица – Расчетные значения  $S_{\text{non.}}$  для различных марок связок кругов и ПСТМ

Связка круга	Обрабатываемый ПСТМ				
	АСБ	СКМ	АСПК	Гексанит-Р	Композит 05
Б1	0,035	0,03	0,035	0,07	0,11
Т02	0,04	0,035	0,04	0,09	0,12

Аналогичная картина наблюдается и при шлифовании СТМ на основе нитрида бора. Например, при обработке гексанита-Р процесс также стабилизируется при расчетной величине подачи, что позволило повысить производительность шлифования с 13 до 79 мм<sup>3</sup>/мин, т.е. почти в 6 раз. Дальнейшее увеличение  $S_{\text{non.}}$  нежелательно по причине резкого роста давления в контакте, мощности шлифования и температуры в зоне обработки, что в конечном итоге может увеличить брак изделий из ПСТМ.

Таким образом, для практического использования следует рекомендовать условия обработки, обеспечивающие минимальные значения давления в контакте для которых величину поперечной подачи необходимо рассчитывать по приведенной выше зависимости. Это позволяет наиболее оптимальным образом использовать алмазные круги на органических связках для шлифования ПСТМ.

**Выводы и перспективы развития.** 1. Таким образом, проведенные исследования позволяют заключить, что использование алмазных кругов на органических связках для шлифования ПСТМ в режиме самозатачивания неизбежно связано со значительным уровнем силовой напряженности процесса обработки. 2. Решить задачу снижения сил путем изменения режимов обработки и характеристики круга для существующих марок органических связок не представляется возможным. Теоретически возможно создание связок, которые будут самозатачиваться при требуемых уровнях давления в контакте. Однако это практически неизбежно будет сопровождаться повышенным удельным расходом алмазных кругов. 3. Установлена особая роль поперечной подачи при шлифовании ПСТМ в режиме самозатачивания алмазных кругов на органических связках. Она состоит в том, что без увеличения максимальных значений давления в контакте и мощности шлифования увеличением подачи можно стабилизировать процесс самозатачивания круга и тем самым существенно повысить производительность процесс обработки ПСТМ. Одновременно с этим можно уменьшить удельный расход алмазов круга примерно в 1,6 раза, что значительно повышает эффективность процесса шлифования в целом. 4. Экспериментальные исследования позволили установить эмпирическую зависимость для определения значения поперечной подачи, при которой достигается максимальное значение производительности обработки без увеличения силовых характеристик процесса шлифования.

В дальнейшем представляют определенный интерес исследования по установлению влияния условий обработки на удельный расход алмазов круга, энергоемкость, а также другие физические и технологические показатели процесса шлифования ПСТМ кругами на органических связках в режиме самозатачивания.

**Список использованных источников:** 1. Семко М. Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, М. Г. Ходоревский. – Харьков: Вища школа, 1980. – 192 с. 2. Новиков Н. В. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов / Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. – К.: Наук. думка, 1993. – 220 с. 3. Пыжов И. Н. Состояние вопроса и перспективы применения алмазов, полученных методом CVD / И. Н. Пыжов, А. В. Васильев, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2011. – Вып.80. – С. 226-235. 4. Пыжов И. Н. Особенности самозатачивания алмазных кругов на органических связках при шлифовании ПСТМ / И. Н. Пыжов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: 2018. – Вып.88. – С. 179-192. 5. А. с. 1006169 СССР. МПК<sup>5</sup> B24V 1/00. Способ шлифования / А. И. Грабченко, И. Н. Пыжов (СССР) – № 3387018/25-08; заявл. 29.12.81; опубл. 23.03.83, Бюл. № 11.

**Bibliography (transliterated):** 1. Semko M.F., Grabchenko A.I., Hodorevskij M.G. Almaznoe shlifovanie sinteticheskikh sverhtverdykh materialov. – Har'kov: Vishha shkola, 1980. – 192 s. 2. Novikov N.V., Majstrenko A.L., Kulakovskij V.N. Soprotivlenie razrusheniju sverhtverdykh kompozicionnykh materialov. – K.: Nauk. dumka, 1993. – 220 s. 3. Pyzhov I.N., Vasil'ev A.V. Klimenko, V.G. Sostojanie voprosa i perspektivy primeneniya almazov, poluchennykh metodom CVD / Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: 2011. – Vyp.80. – S.226-235. 4. Pyzhov I. N. Osobennosti samozatachivaniya almaznykh krugov na organicheskikh svyazkah pri shlifovanii PSTM / Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: 2018. – S. 179-192. 5. A. s. 1006169 SSSR. MPK<sup>5</sup> B24V 1/00. Sposob shlifovaniya / A. I. Grabchenko, I. N. Pyzhov (CSSR) – № 3387018/25-08; zayavl. 29.12.81; opubl. 23.03.83, Bjul. № 11.